编者按 黄河是中华民族的母亲河、中华文明的摇篮，保护黄河是事关中华民族伟大复兴和永续发展的千秋大计。习近平总书记强调，“黄河流域是我国重要的生态屏障和重要的经济地带，是打赢脱贫攻坚战的重要区域，在我国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的地位”。治理黄河，重在保护，要在治理，黄河流域生态保护和高质量发展是一个复杂的系统工程，对一些重大问题，更是要深入研究、科学论证。《院刊》特邀请中国科学院东亚区域气候 - 环境重点实验室马柱国研究员团队和中国科学院地理科学与资源研究所张文忠研究员团队分别从黄河流域“生态保护”和“高质量发展”两个维度，从科学角度为治理黄河提供思路与支撑。

黄河流域气候与水文变化的现状及思考

马柱国[1,2*] 符淙斌[1,2,3] 周天军[1] 严中伟[1,2] 李明星[1] 郑子彦[1] 陈 亮[1] 吕美霞[1]
1 中国科学院大气物理研究所 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室 北京 100029
2 中国科学院大学 北京 100049
3 南京大学 南京 210093

摘要 黄河是中华民族的母亲河，孕育了博大精深的中华文明。同时，流域频发的水旱灾害也给黄河两岸的人民群众带来了深重的灾难。当前，由于全球增暖和人类活动加剧的影响，黄河流域气候及水文过程发生了显著的变化，流域整体气候的暖干化和人类用水的不断增加使得黄河流域的水文干旱不断加剧。“退耕还林还草”政策的实施使得黄土高原的植被覆盖得到极大改善，有效地抑制了严重的水土流失，但同时也导致该地区土壤的干化和干土层的加厚，这些是黄河流域生态保护和高质量发展面临的重大问题，也是涉及气候-水-生态-人类社会如何协同发展的基础科学问题。

关键词 黄河流域，气候暖干化，径流减少，人类用水

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20191223002

2019年9月18日，习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上发表重要讲话，指出“保护黄河是事关中华民族伟大复兴的千秋大计”，并强调黄河流域生态保护和高质量发展是国家战略，对一些重大问题要深入研究、科学论证。黄河是我国西北和华北地区的重要水源，截至2018年底黄河流经的9个省份总人口达4.2亿，占全国人口的30.3%；地区生产总值23.9万亿元，占全国的26.5%[1]。习近平总书记的讲话把黄河流域的生态保护和高质量发展上升到国家战略的高度，充分说明了黄河流域在国家安全中的重要地位。

* 通讯作者
资助项目：国家自然科学基金（41530532、41605085、41705072）
修改稿收到日期：2020年1月10日

黄河流域以其占全国2.2%的径流量，承担着占全国15%的耕地和12%人口的供水任务[2,3]。作为我国主要的能源基地，黄河流域煤炭资源占全国的70%，石油储量占50%，大规模的能源开发同样需要大量的水资源。目前，人类对水资源的需求已经远超流域水资源的承载力，导致对地表水的过度利用和地下水的过度开采，人类用水已经显著改变了流域的水循环及水资源格局[4]。黄河流域大部分地区处于干旱半干旱区，对气候变化极其敏感，近年来气候呈暖干化是导致黄河流域径流量明显减少的原因之一[5-7]。在气候变暖和人类活动的双重影响下，黄河流域水资源的供需矛盾更加突出，已成为我国水资源极其短缺的地区之一[3,4]，并在未来10—30年内仍将继续面临水资源严重短缺的严峻挑战。

流域尺度的人类无序用水和气候变化的共同作用会对黄河流域区域水循环产生怎样的影响？未来是否可以持续？“退耕还林还草”使得黄河流域植被状况得到了显著改善，这种改善对流域产流会产生什么样的影响？上述问题的核心就是气候变化-水-生态-人类社会的协同机制问题，而对这些问题的回答是保障黄河流域生态系统健康的科学基础。本文通过分析近半个世纪以来黄河流域气候水文的变化，揭示气候变暖和人类活动对黄河流域水资源影响的事实，从水资源现状指出黄河流域生态保护所存在的问题，最后给出了实施黄河流域生态保护和高质量发展亟待进行研究的基础科学问题。

1 黄河流域气候及水资源变化的现状

黄河流域大部分地区地处于旱半干旱区，气候复杂多样，流域大部分地区年降水量在500 mm以下；伴随着全球变暖，近年来黄河流域的气候要素也发生了显著的变化。

1.1 黄河流域的气候变化

由图1a和b可以看出，1951—2018年黄河流域气温存在显著的上升趋势，且具有明显的区域差异。不难发现，增温最显著是河套地区；其次是中下游地区；增温最弱的是上游地区。整个流域年平均气温68年间升高了1.39°C，而区域平均年降水量却减少了10 mm，因此黄河流域在过去68年整体趋于暖干化。通过分析图1c和d可以发现，黄河上游地区年降水具有明显的增加趋势，而中下游表现为明显的减少

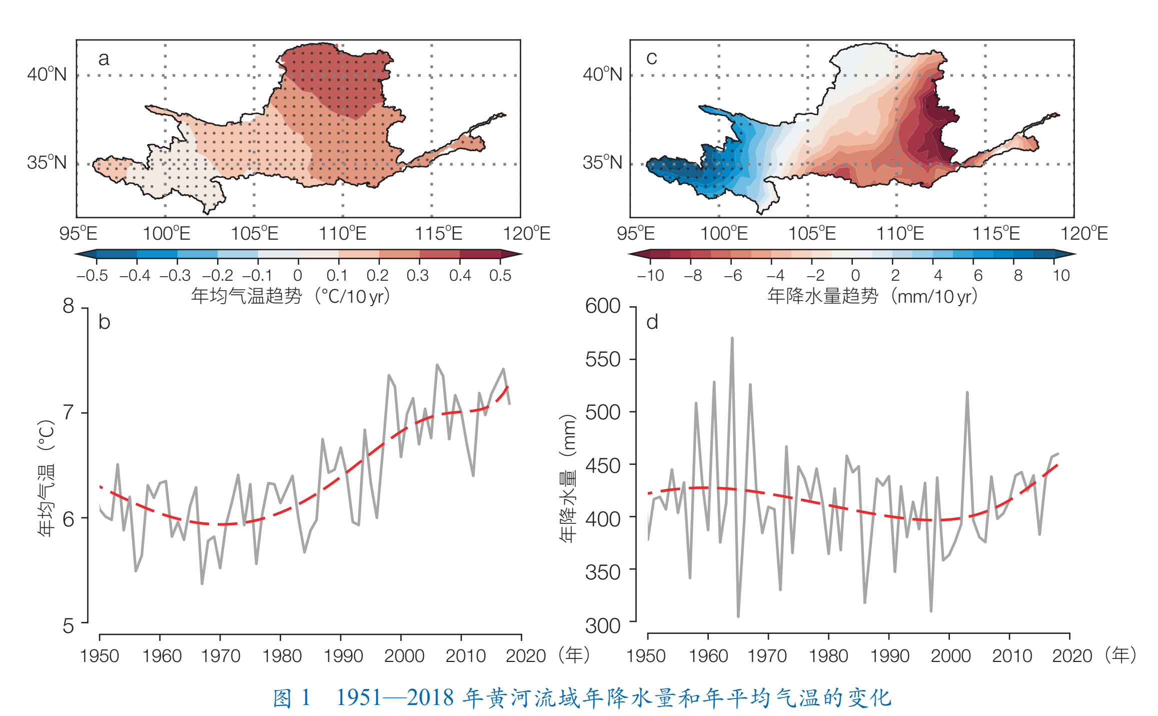


图1 1951—2018年黄河流域年降水量和年平均气温的变化

（a）年均气温变化趋势；（b）流域年平均气温变化；（c）年降水量变化趋势；（d）流域平均年降水量变化

趋势。在上游区域，流域年平均气温近 68 年间上升了0.82℃，年降水量增加了 33 mm；中游地区年均气温 68 年间上升了 1.67℃，年降水量减少了 31.6 mm。此外，降水集中度是一个表征降水过程的有效指标，当降水集中度的值大时，极端降水产生的频率就大，这种降水过程的变化对径流的产生也具有重要作用，同样的降水量由于降水过程的不同而产生的径流量也不同。由图 2 可以看出，1951—2018 年黄河流域大部分地区降水集中度为增大趋势，尤其是中下游地区，这说明黄河流域的极端降水过程正趋于增多。

从整个流域来讲，气候呈现暖干化趋势，而极端降水过程也正趋于增加，这些现象将对流域的水资源系统产生重要的影响。

1.2 黄河流域的水资源变化及人类用水

黄河流域地处干旱半干旱区，也是人类活动最剧烈的地区之一，水资源对气候变化和人类活动的响应极为敏感。气候趋于暖干化及流域大范围植被覆盖的增加，使得黄河流域水资源状况发生了显著的变化。以下将从黄河流域径流变化的基本事实入手，分析流域人类用水状况。

由图 3 可以看出，1961—2016 年黄河流域无论是实测径流还是天然径流，都存在明显的下降趋势。天然径流的下降趋势与该时段气候的暖干化有关，其中降水的减少是天然径流减少的主要原因；而气温的升高将使得流域蒸散发过程加速，不利于径流的产生。实测径流的大幅度减少除与气候流域中下游地区暖干化有关外，人类对地表水的过度利用也是黄河径流减少的主要因素之一。

黄河流域是我国主要的粮食基地和能源基地，水资源供需矛盾尤为突出，农业用水的比重占整个流域供水量的 60% 以上。从图 4 可以看出，全流域人类用水占地表总径流量的比例从 20 世纪 50 年代的不足 20% 上升到最近的 85% 以上，地表水资源的利用比远超健康河流的警戒线（40%）。

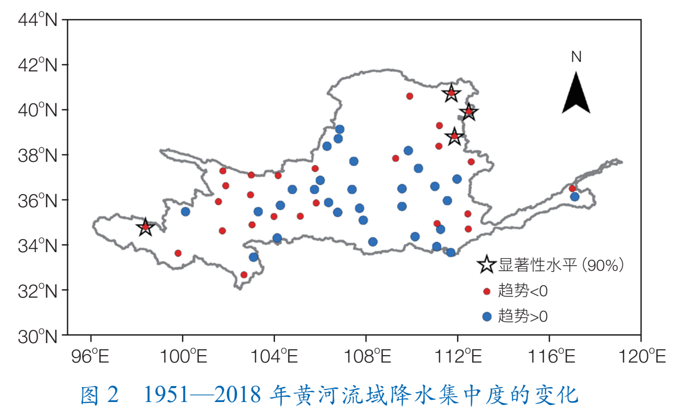


图 2　1951—2018 年黄河流域降水集中度的变化

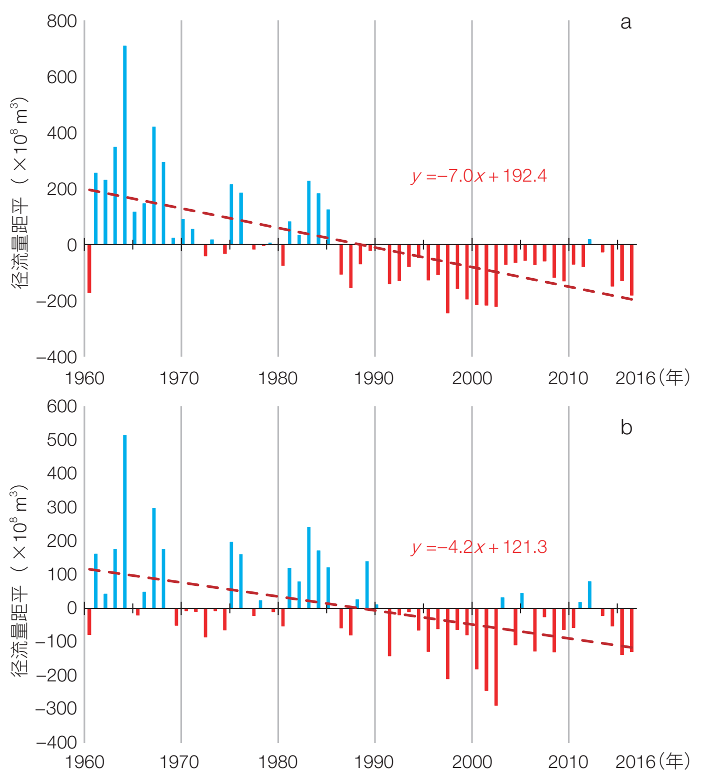


图 3　1961—2016 年黄河流域实测（a）和天然（b）径流的变化

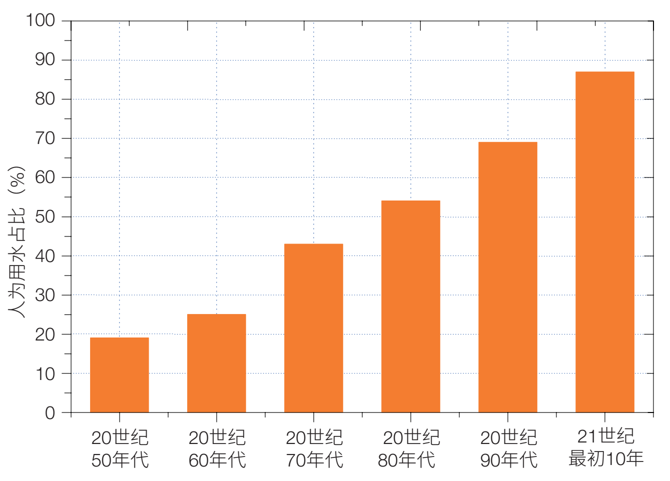


图 4　20 世纪 50 年代以来黄河流域人为用水占天然径流的百分比

从图5可以看出，农业用水从2002年开始有一个减小趋势（2002—2018年减少了$3.4741×10^9\,m^3$），工业用水在2011年达到历史最高的$6.55×10^9\,m^3$。2002—2018年，工业和农业用水稳中略有增加（$+1.451×10^8\,m^3$）；但生活用水和生态用水却有明显的增长趋势，分别增加了$1.459×10^9$和$1.94×10^9\,m^3$。黄河流域人类用水中，农业用水占比最高，2002—2018年平均占比达72%。以2012年为例，地表水和地下水的总供水量为$5.246×10^{10}\,m^3$，占黄河流域水资源量的68%；而仅农业的用水量就为$3.4672×10^{10}\,m^3$，耗水量为$2.8099×10^9\,m^3$，相当于整个流域单位面积平均蒸发增加了约35 mm，这显著地改变了整个流域的蒸散发大小[8]。由于地表水供应的严重不足，黄河流域地下水严重超采，2010年黄河流域浅层地下水蓄水量比上年减少$1.63×10^8\,m^3$，形成了12个地下水漏斗区。统计表明，黄河流域平原地区地下水资源量为$1.546×10^{10}\,m^3$，而近年来黄河流域平原区平均地下水开采量为$1.323×10^9\,m^3$，远超该地区地下水与地表水的可重复量①。另外，黄河干支流已建大型水库20余座，总库容超过$7×10^{10}\,m^3$，远超黄河的河川径流量，并且水库及库容量的增

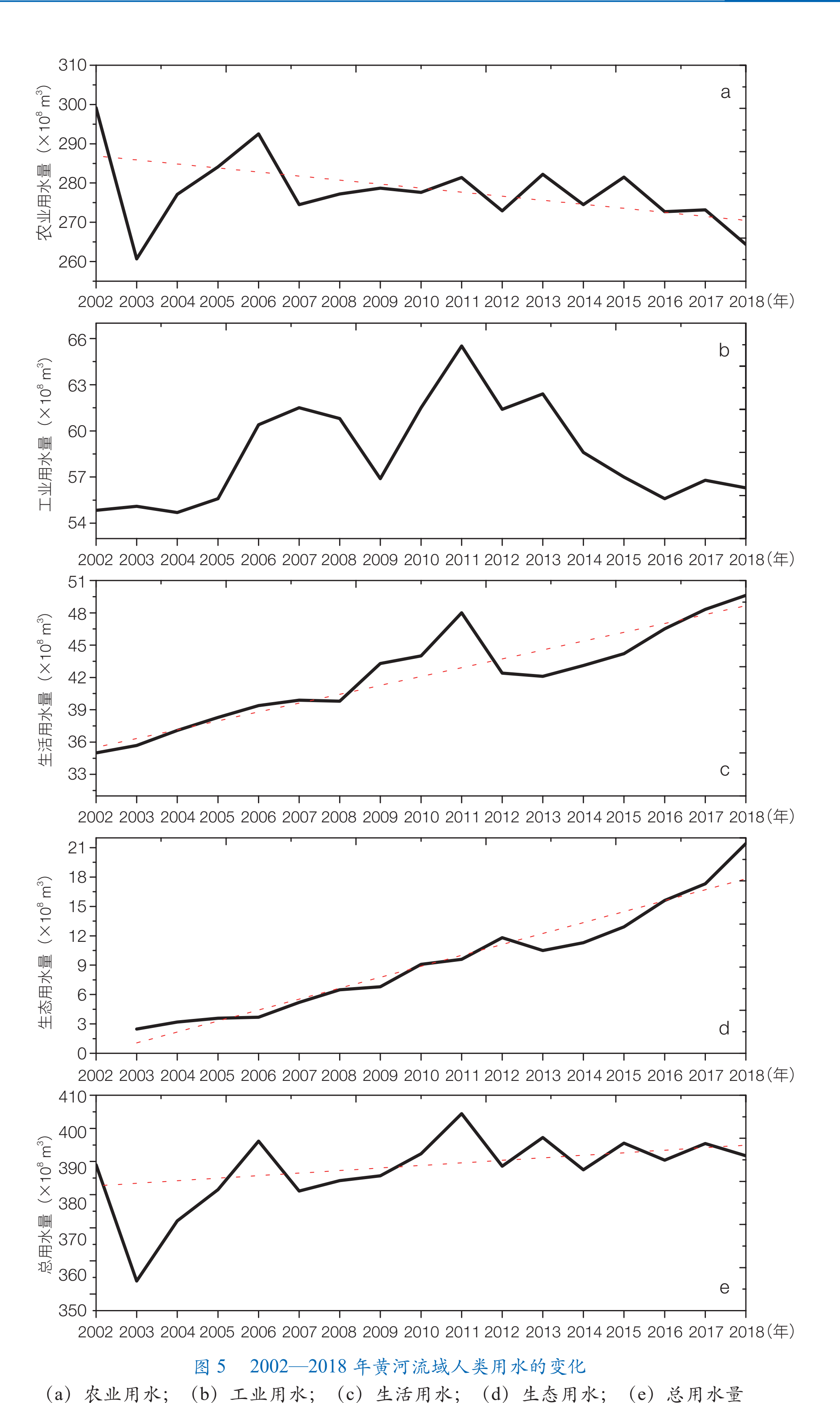


图5 2002—2018年黄河流域人类用水的变化

（a）农业用水；（b）工业用水；（c）生活用水；（d）生态用水；（e）总用水量

① http://www.yellowriver.gov.cn/other/hhgb/2011/index.html.

加使得整个流域地表水体近10年迅速扩大。人类用水（包括地下水的抽取和地表水利用）已改变了黄河流域水资源分布格局，并能对局地水文循环和区域气候产生一定的反馈和影响。例如，农田灌溉增加了土壤湿度和蒸发，进而影响了大气降水及其对地下水的补给，形成对“三水”（大气降水、地表水和地下水）转换过程的重要影响[8,9]。

2 黄河流域植被变化对流域水循环过程的影响

2.1 黄河流域的植被变化

黄河流域作为生态系统的敏感区，尤其是近年来实施的“退耕还林还草”政策，使得整个流域的植被覆盖发生了显著的变化。由图6a可以看出，黄河流域大部分地区植被覆盖在2000年以后明显变好，且黄河中下游植被覆盖增加最为显著。图6b清楚地显示出，在2000年以后，整个黄河流域植被覆盖指数（leaf area index，LAI）显著增大，增加幅度达36.6%。进一步的分析表明，上游流域（兰州站以上集水区）1982—2017年LAI增加了22.8%，中下游流域增加43.9%；上游流域年平均气温1982—2017年上升了0.82℃，年降水量增加了33.0 mm；而中下游流域平均升温达1.67℃，年降水量减少了31.6 mm。从两个区域气候和植被覆盖变化的对比可以发现，上游流域升温且降水增多，植被覆盖的增加主要是气候要素的变化所引起的；而中下游显著的暖干化气候变化是植被生长的不利因素，但中下游地区的植被覆盖度增长却约是上游的2倍。可以推断，气候变化主导了上游流域的植被增加，而中下游植被增长与“三北防护林”建设和“退耕还林还草”政策的实施密切相关。

2.2 植被变化对黄河流域水循环过程的影响

气候变化和人类活动是影响流域水循环的两个重要方面。但由于不同流域之间地形地貌和气候变化的区域差异及气候的多样性，加之人类活动方式的不同，导致不同流域水循环及其影响因子具有特殊性，形成一个流域尺度上自然和人类，包括水-土-气-生相互作用过程的复杂系统，流域水循环变化机制的研究离不开对这些相互作用过程的探究。但从目前的进展来看，仅考虑单影响因子与水循环的相互作用[12]，缺乏对各种因子影响流域水循环的相对贡献和综合影响的估算研究。存在的主要问题可归纳为2个方面：① 单向驱动的水文模型无法客观描述气候变化或人类活动和流域水循环的相互作用过程，没有系统考虑大气-植被-水文的完全耦合；② 在流域尺度上没有考虑气候变化和人类活动的综合效应，缺乏对不同影响因素相对贡献的客观评估，有关黄河流域的研究同样存在上述问题。

如前所述，自从1999年实施“退耕还林还草”政策以来，黄河流域植被覆盖度显著增大，如此显著的植被变化会对整个流域的水循环产生怎样的影响？当前的黄河流域径流量的急剧减少与植被覆盖变化是否有关？目前，还缺乏从物理成因的角度去解释其形成机制的研究。例如，近年来黄土高原输沙量的锐减与这个时段降水关系不大（降水在这个时段偏丰），其主要原因是人类活动改变了下垫面的植被覆盖，因为植被覆盖度的增加遏制了因降水产生的水土流失，减少了输入河流的泥沙[21]。然而，在泥沙锐减的同时，流域内的产流也急剧减少，形成了黄河流域特有的水沙矛盾[3,22,23]；而植被覆盖的增加也增大了下垫面的植被蒸腾，进而引起土壤中水分的减少和黄土中干土层的加厚，导致土壤中水分的供需不平衡[24]。另外，产流占比整个流域35%的黄河源区由于地处青藏高原，下垫面十分复杂，对气候变暖响应敏感，不同区域的气温、降水及其影响下积雪、冻土、植被等地表过程的变化及其对区域水文过程与水资源的影响存在着明显的差异[25-27]。在气候暖干化、径流急剧减少和人类用水不断增加的背景下，如何厘清上述科学问题背后的机制和机理，是实现黄河流域生态保护和高质量发展所面临的重大挑战。

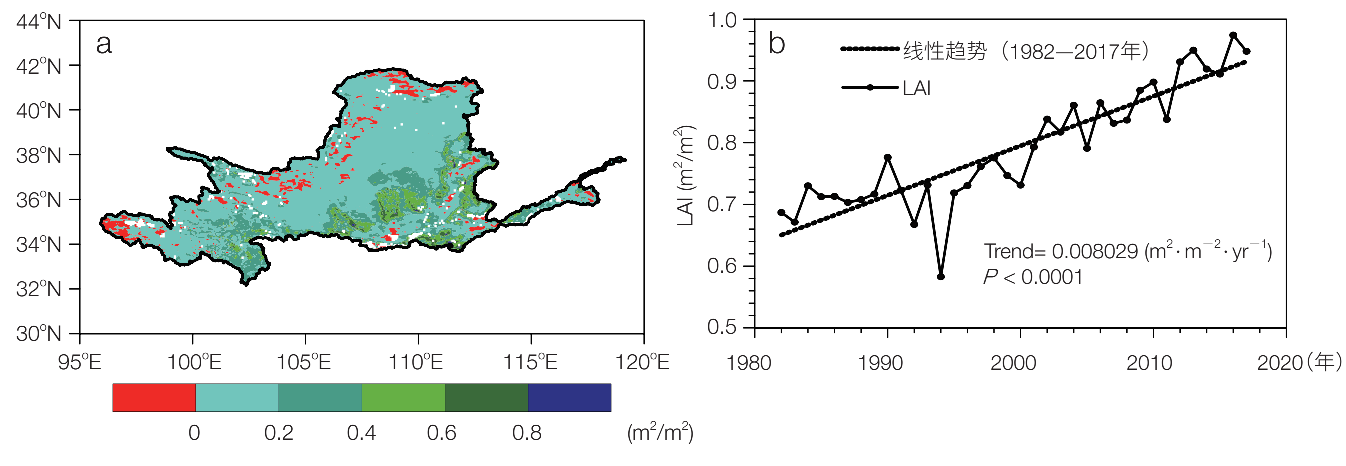


图 6　1982—2017 年黄河流域植被变化的分布

（a）2000—2017 年多年 LAI 平均值减去 1982—1999 年的多年 LAI 平均值；（b）全流域年平均 LAI 的变化

3 黄河流域生态保护和高质量发展的思考

综上所述，在全球增暖和人类活动的共同影响下，黄河流域的气候及水文过程发生了显著的变化，中下游气候的暖干化、流域径流量的大幅减少、极端气候事件的增多、植被改善但土壤水分减小和土壤干层不断加厚等已成为黄河流域生态保护和实现高质量发展所面临的主要问题。从科学研究的层面来讲，黄河流域生态保护和高质量发展是涉及多学科交叉的复杂问题。然而，已有的研究尚不具备足以支撑黄河流域生态保护和高质量发展的科学基础。习近平总书记 2019 年 9 月 18 日的讲话已经把黄河流域生态保护及高质量发展提升为国家战略，其核心目标有：① 加强生态保护；② 保障黄河长治久安；③ 推进水资源节约集约利用；④ 推动黄河流域高质量发展；⑤ 保护、传承、弘扬黄河文化。要实现这些战略目标，亟待对以下 5 个基础科技问题开展研究。

（1）建立黄河流域水-土-气-生综合观测协同网络并实现数据共享。过去在黄河流域进行了大量的观测实验研究，如黄河源区的水-土-气-生观测试验、黄土高原的小流域观测试验等，也积累了丰富数据。但这些研究大部分都是各自为政，未能构建起从黄河流域水-土-气-生相互作用角度出发的长期连续的国家综合观测网络，难以实现不同学科之间数据的共享。这极大地限制了相关科学研究工作的进展，也对国家的科技投资造成了极大浪费。因此，开展黄河流域生态保护基础科学问题的研究，建立黄河流域水-土-气-生综合观测协同网络并实现数据共享是当务之急。

（2）发展高分辨率流域气候-水文-生态-人类社会经济耦合模式。过去对黄河流域的研究已经取得了丰富的成果和长足的进展，但从地球系统科学的角度进行的多圈层相互作用研究还很薄弱，区域高分辨率地球系统模式在流域尺度还没有得到很好的研究和应用。因此，在水-土-气-生的相互作用过程取得新认识的基础上，发展高分辨率流域气候-水文-生态-社会经济耦合模式，将为在黄河流域开展“气候-水-生态-社会经济系统机制”研究提供有效工具。

（3）气候-水-生态-人类社会经济的协同发展机制研究。黄河流域生态保护和高质量发展的核心是气候-水-生态-人类社会的协同发展。保障这种协同发展，需要利用流域高分辨的水-土-气-生相互耦合的模式进行定量评估和综合分析，厘清不同过程之间的相互协同机制，提出协同的最优方案。

（4）未来10—50年黄河流域气候变化的情景预估及可能影响。在充分认识气候-水-生态-人类社会协同机制和协同最优方案的基础上，利用发展完善的耦

合模式开展未来10—50年黄河流域气候变化的情景预估，既是制定未来黄河流域生态保护和高质量战略规划科学基础的重要组成部分，也是主动应对气候变化的有效途径。

（5）探索黄河流域动态分水方案和水资源节约集约利用的关键技术。气候呈暖干化是实现黄河流域水资源可持续利用的不利因素。黄河流域水资源年际变化差异大，且存在明显的径流减少趋势。因此，需要探索流域动态的水资源管理方案，以应对黄河流域水资源供需矛盾突出的严峻挑战。此外，流域的节约用水也是一个永恒的话题。应在气候时间尺度上，把未来水资源的可能情景作为刚性约束，大力发展行业节水的关键技术，实施全社会节水，推动用水方式由粗放向节约集约转变，以期为黄河流域的高质量发展提供最基础、最关键和最重要的水资源保障。

参考文献

1 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 求是, 2019, (20): 1-5.

2 夏军, 彭少明, 王超, 等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理. 人民黄河, 2014, 36(10): 1-15.

3 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15.

4 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310.

5 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270-1275.

6 Lv M X, Ma Z G, Lv M Z. Effects of climate/land surface changes on streamflow with consideration of precipitation intensity and catchment characteristics in the Yellow River Basin. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2018, 123: 1942-1958.

7 Lv M X, Ma Z G, Li M X, et al. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the Grain for Green program in the Yellow River basin. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2019, 124: 1336-1351.

8 Lv M X, Ma Z G, Chen L, et al. Evapotranspiration reconstruction based on land surface models and observed water budget components while considering irrigation. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20: 2161-2183.

9 Chen L, Ma Z G, Zhao T B, et al. Simulation of the regional climatic effect of irrigation over the Yellow River Basin. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, 10(4): 291-297.

10 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.

11 Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China. Journal of Hydrology, 2006, 328: 548-558.

12 Sorooshian S, AghaKouchak A, Li J L. Influence of irrigation on land hydrological processes over California. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2014, 119(23): 13137-13152.

13 Lan C, Zhang Y X, Gao Y H, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. Journal of Hydrology, 2013, 502: 37-52.

14 López-M J I, J Zabalza, S M Vicente-Serrano, et al. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. Science of the Total Environment, 2014, 493: 1222-1231.

15 Nie W M, Yuan Y P, W Kepner, et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. Journal of Hydrology, 2011, 407: 105-114.

16 Wang R Y, L Kalin, Kuang W H, et al. Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf

Bay watershed streamflow in southern Alabama. Hydrological Processes, 2014, 28: 5530-5546.

17 Hu Z D, Wang L, Wang Z J, et al. Quantitative assessment of climate and human impacts on surface water resources in a typical semi-arid watershed in the middle reaches of the Yellow River from 1985 to 2006. International Journal of Climatology, 2015, 35: 97-113.

18 Wang J H, Hong Y, Gourley J, et al. Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response: a case study in a sub-basin of the Yellow River, China. International Journal of Climatology, 2010, 30: 2130-2137.

19 Tadanobu N. Simulation of the effect of irrigation on the hydrologic cycle in the highly cultivated Yellow River Basin. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151: 314-327.

20 Li L, Shen H Y, Dai S, et al. Response of runoff to climate change and its future tendency in the source region of Yellow River. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(3): 431-440.

21 李晓宇, 刘晓燕, 李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响. 水利学报, 2016, 47(10): 1253-1268.

22 Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.

23 Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8: 739-741.

24 Jia X X, Shao M G, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113-122.

25 谢昌卫, 丁永建, 韩海东, 等. 黄河源区径流波动变化对气候要素的响应特征. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 7-11.

26 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应. 山地学报, 2004, 22(3): 278-285.

27 蓝永超, 朱云通, 刘根生, 等. 黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究. 冰川冻土, 2016, 38(3): 741-749.

Status and Ponder of Climate and Hydrology Changes in the Yellow River Basin

MA Zhuguo[1,2*] FU Congbin[1,2,3] ZHOU Tianjun[1] YAN Zhongwei[1,2] LI Mingxing[1]
ZHENG Ziyan[1] CHEN Liang[1] LV Meixia[1]

(1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract The Yellow River is known as China's Mother River, which fosters the great and profound Chinese civilization. However, the frequent flood and drought disasters have also brought serious disasters to the people who live in the Yellow River Basin. At present, significant changes have taken place in the climate and hydrological processes of the Yellow River Basin due to global warming and human activities. The warming and drying climate and increase of human water use in the Yellow River Basin have led to an increase

* Corresponding author

in hydrological drought. Although the Grain for Green program has greatly improved the vegetation coverage on the Loess Plateau and effectively inhibited severe soil erosion, but also enhanced the soil desiccation and enlarged the dry soil layers in this area. These phenomena are not only the major challenges for ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, but also the basic scientific issues which related to the coordinated development of climate-water-ecology-society.

Keywords the Yellow River Basin, warming and drying climate, decreased streamflow, human water use



马柱国 中国科学院特聘研究员，中国科学院大学岗位教授。中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室主任，全球变化国家重大研究计划“973”项目首席科学家（2012—2016年），国家重点研发计划《全球变化及应对》项目首席科学家（2016—2021年），国家自然科学基金重点项目负责人（2016—2020年）。研究兴趣集中在区域气候的分析及模拟、区域模式的发展和应用、地表水分过程对气候变化的影响、干旱化的检测和形成机理、城市化对气候变化影响等方面。兼任中国科学院和教育部多个重点实验室学术委员会委员及多个期刊编委。发表论文共计130余篇，其中SCI论文70余篇，参与和与他人合作著作3部。曾获科学技术部重大基础研究计划“973”项目先进个人及省部级奖3次。

E-mail: mazg@tea.ac.cn

MA Zhuguo Researcher/Ph.D. Tutor, specially-appointed researcher of Chinese Academy of Sciences (CAS) / Post Professor of the University of Chinese Academy of Sciences. Currently, he serves as the director of the Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, CAS. He is the chief scientist of the National Major Research Program (973 Program) project of global change (2012–2016), the National Key R&D Program of China (2016–2021), and the National Natural Science Foundation of China (2016–2020). His research interests focus on the analysis and simulation of regional climate, the development and application of regional models, the impact of surface moisture processes on climate change, the detection and formation mechanisms of global and regional drought, and the impact of urbanization on climate change. He is also a member of the academic committees of several key laboratories of CAS and the Ministry of Education, and the editorial board of many journals such as *Atmospheric Sciences*. He has completed and published more than 130 papers, including more than 70 SCI-indexed papers, and participated in and collaborated with others for 3 books. In 2004, he was awarded the advanced individual of the 973 Program of the Ministry of Science and Technology's major basic research plan, and won the provincial and ministerial awards 3 times. E-mail: mazg@tea.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话. 求是, 2019, (20): 1-3.
Xi J P. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin. Qiushi, 2019, (20): 1-3. (in Chinese)

2 夏军, 彭少明, 王超, 等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理. 人民黄河, 2014, 36(10): 1-4.
Xia J, Peng S M, Wang C, et al. Impact of climate change on water resources and adaptive management in the Yellow River Basin. Yellow River, 2014, 36(10): 1-4. (in Chinese)

3 刘昌明, 田巍, 刘小莽, 等. 黄河近百年径流量变化分析与认识. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15.
Liu C M, Tian W, Liu X M, et al. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in recent 100 years. Yellow River, 2019, 41(10): 11-15. (in Chinese)

4 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310.
Zhang J Y, He R M, Qi J, et al. A new perspective on water issues in North China. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese)

5 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270-1275.
Ma Z G. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(6): 1270-1275. (in Chinese)

6 Lv M X, Ma Z G, Lv M Z. Effects of climate/land surface changes on streamflow with consideration of precipitation intensity and catchment characteristics in the Yellow River Basin. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(4): 1942-1958.

7 Lv M X, Ma Z G, Li M X, et al. Quantitative analysis of terrestrial water storage changes under the Grain for Green program in the Yellow River basin. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019: 2018JD029113.

8 Lv M X, Ma Z G, Chen L, et al. Evapotranspiration reconstruction based on land surface models and observed water budget components while considering irrigation. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(11): 2163-2183.

9 Chen L, Ma Z G, Zhao T B, et al. Simulation of the regional climatic effect of irrigation over the Yellow River Basin. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, 10(4): 291-297.

10 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
Fu B J, Qiu Y, Wang J, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the Loess Plateau, China. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(6): 717-722. (in Chinese)

11 Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, et al. Potential water yield reduction due to forestation across China. Journal of Hydrology, 2006, 328(3-4): 548-558.

12 Sorooshian S, AghaKouchak A, Li J L. Influence of irrigation on land hydrological processes over California. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(23): 13137-13152.

13 Cuo L, Zhang Y X, Gao Y H, et al. The impacts of climate change and land cover/use transition on the hydrology in the upper Yellow River Basin, China. Journal of Hydrology, 2013, 502: 37-52.

14 López-M J I, Zabalza J, Vicente-Serrano S M, et al. Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. Science of the Total Environment, 2014, 493: 1222-1231.

15 Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper

San Pedro watershed. Journal of Hydrology, 2011, 407(1-4): 105-114.

16 Wang R Y, Kalin L, Kuang W H, et al. Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf Bay watershed streamflow in southern Alabama. Hydrological Processes, 2014, 28: 5530-5546.

17 Hu Z D, Wang L, Wang Z J, et al. Quantitative assessment of climate and human impacts on surface water resources in a typical semi-arid watershed in the middle reaches of the Yellow River from 1985 to 2006. International Journal of Climatology, 2015, 35(1): 97-113.

18 Wang J H, Hong Y, Gourley J, et al. Quantitative assessment of climate change and human impacts on long-term hydrologic response: a case study in a sub-basin of the Yellow River, China. International Journal of Climatology, 2010, 30(14): 2130-2137.

19 Nakayama T. Simulation of the effect of irrigation on the hydrologic cycle in the highly cultivated Yellow River Basin. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(3): 314-327.

20 Li L, Shen H Y, Dai S, et al. Response of runoff to climate change and its future tendency in the source region of Yellow River. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(3): 431-440.

21 李晓宇, 刘晓燕, 李焯. 黄河主要产沙区近年降雨及下垫面变化对入黄沙量的影响. 水利学报, 2016, 47(10): 1253-1259.

Li X Y, Liu X Y, Li Z. Effects of rainfall and underlying surface on sediment yield in the main sediment-yielding area of the Yellow River. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(10): 1253-1259. (in Chinese)

22 Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. Nature Geoscience, 2016, 9(1): 38-41.

23 Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, et al. Balancing green and grain trade. Nature Geoscience, 2015, 8(10): 739-741.

24 Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113-122.

25 谢昌卫, 丁永建, 韩海东, 等. 黄河源区径流波动变化对气候要素的响应特征. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 7-11.

Xie C W, Ding Y J, Han H D, et al. Analysis on the runoff change and its response to the climatic factors at the source regions of Yellow River. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(4): 7-11. (in Chinese)

26 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应. 山地学报, 2004, 22(3): 278-285.

Yang J P, Ding Y J, Chen R S, et al. Permafrost change and its effect on eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers. Journal of Mountain Research, 2004, 22(3): 278-285. (in Chinese)

27 蓝永超, 朱云通, 刘根生, 等. 黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究. 冰川冻土, 2016, 38(3): 741-749.

Lan Y C, Zhu Y T, Liu G S, et al. Study of the seasonal characteristics and regional differences of climate change in source regions of the Yellow River. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 741-749. (in Chinese)